

外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギー・ミュレーションツール「BEST」の開発（その186）

—省エネルギー型大温度差水蓄熱・FCU-水・空気式空調システムの性能（第3報）—

Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST

(Realizing Energy-efficient Water-Air HVAC System with Fan-coil-units and TES System, Part-3)

-Comparison with Actual Results and Simulation Results of LCEM Tool-

正会員○中塚 一喜（三晃空調）

技術フェロー 柳原 隆司（東京電機大学）

特別会員 村上 周三（建築環境・省エネルギー機構）

正会員 二宮 博史（日建設計）

名誉会員 中原 信生（環境シック中原研究処）

技術フェロー 石野 久彌（首都大学東京名誉教授）

Kazuki NAKATSUKA^{*1} Hiroshi NINOMIYA^{*2} Takashi YANAGIHARA^{*3}

Nobuo NAKAHARA^{*4} Shuzo MURAKAMI^{*5} Hisaya ISHINO^{*6}

^{*1} Sanko Air Conditioning Co. Ltd. ^{*2} Nikken Sekkei ^{*3} Tokyo Denki University

^{*4} Nakahara Laboratory, Environmental Syst.-Tech. ^{*5} Institute for Building Environment and Energy Conservation

^{*7} Tokyo Metropolitan University

Using CKK as the building and HVAC system model the simulation program 'BEST' was verified by comparing with actual system operation results for heat pump system with temperature-stratified thermal storage tanks. Another subject of the present paper is comparison of simulation results between 'BEST' and 'LCEM' for verification of energy efficiency of water-air system using fan-coil units with high water temperature difference for thermal storage tank comparing with VRV system. The dynamics of thermal storage tank was verified reasonable among three kinds of results, also showing the proposed water-air system had considerably energy efficient characteristics, leaving some improvable subjects.

はじめに

本報では、BEST 専門版 ver.1602（以下、BEST と表記）による水蓄熱システムの計算結果と実測値を比較し、プログラムの精度を検証した。対象建物は温度成層型水蓄熱槽が採用されている名大 CKK^{1)ビル}とした。

また、前報²⁾³⁾で概要を述べた“省エネルギー型大温度差水蓄熱・FCU-水・空気式空調システム（以下、FCU 方式と表記）”と“ビル用マルチ方式パッケージ空調システム（以下、PAC 方式と表記）”の省エネ性について BEST と LCEM ツール（以下、LCEM と表記）を用いて検討した。対象建物は、上記と同様 FCU 方式である名大 CKK ビルとした。

1. 実測値比較による温度成層型水蓄熱槽の精度検証

1.1 建物概要

建物名称：名古屋大学研究所共同館

延床面積：7,046 m²（一般系統換算延床面積 4,403m²）

階数：8 階

建物種別：研究実験棟

用途構成割合：50% [教官室・院生室] 17% [実験室]

竣工：2013 年 2 月

一般系統熱源：温度成層蓄熱槽 126m³ × 2 槽

井水熱源高効率ヒートポンプ(HP)100RT

一般系統空調：大温度差確保 FCU+エコ外気導入

名大 CKK ビルの主要機器を表 1 に示す。システム等、詳しくは前報²⁾³⁾を参照されたい。なお名大 CKK ビル運用時、熱源能力は COP の最も高い定格能力比率 75% に設定して運転が開始されたが、運転開始後約半年後から高効率化のために採用された既存井水（冷却水・熱源水）に不具合が生じ、12 月に入った頃より極端に水量が低下し、一方では冷房負荷は予想以上に内部負荷が少なく、また暖房負荷は冷房で選ばれたヒートポンプ設置容量に対して十分に余裕があつたのに助けられて、蓄熱槽は一槽運転、熱源容量は最悪 25% の低負荷運転を余儀なくされたこともあり、シミュレーションと比較することの意義が満たされないために、本報前半の実測とシミュレーションとの比較対象は真夏の熱源、蓄熱槽周りに重点をおいて検証する。後半の LCEM と BEST の比較に関しては実態負荷を考慮して調整された負荷計算条件に基づいて行われたほか、比較が公平に行われるよう中央蓄熱用熱源機も空気熱源方式とした。

たのに助けられて、蓄熱槽は一槽運転、熱源容量は最悪 25% の低負荷運転を余儀なくされたこともあり、シミュレーションと比較することの意義が満たされないために、本報前半の実測とシミュレーションとの比較対象は真夏の熱源、蓄熱槽周りに重点をおいて検証する。後半の LCEM と BEST の比較に関しては実態負荷を考慮して調整された負荷計算条件に基づいて行われたほか、比較が公平に行われるよう中央蓄熱用熱源機も空気熱源方式とした。

1.2 BEST によるシミュレーション

図 1 に実測値との比較を行う範囲を示す。計算対象は、

表 1 名大 CKK ビルの主要機器表

機器	機器名称	定格能力仕様			台数	
		冷却出力				
R-1	水熱源ヒートポンプ	冷却能力	kW	348.5	1	
		消費電力	kW	56.4		
		冷水入口	°C	16		
		冷水出口	°C	6		
		冷水水量	L/min	500		
		温水出力				
		加熱能力	kW	403.1		
		消費電力	kW	65.4		
		温水入口	°C	31		
		温水出口	°C	41		
PC-1 PH-1	冷温水一次ポンプ	温水流量	L/min	580	2	
		流量	L/min	730		
		動力	kW	3.1		
		変流量制御				
PCH-1-1	放熱一次ポンプ	利用温度差	°C	8	2	
		流量	L/min	640		
		動力	kW	3.7		
PCH-2-1 ~6	放熱二次ポンプ	変流量制御			6	
		流量	L/min	140		
		動力	kW	2.2		
		変流量制御				
		蓄熱槽	蓄熱槽容量	m ³	126	2

蓄熱槽を含む1次側とし2次側は計算を行わないものとした。BEST上で図1に合うようモデルを作成し、境界条件に名大CKKビルのBEMSより取得した還水流量と還水温度(図1赤丸部)を入力した。但し、BEST上で井水熱源HPが再現できないため、熱源は実機と同能力の空冷式ヒートポンプとした。また、実測値との比較を行う期間として夏期2013年6月～9月までとした。

1.3 热源処理熱量と夜間移行率について

1次側についてBESTのシミュレーション結果とBEMSより取得した実測値を比較し、精度検証を行った。図2に月別熱源処理熱量と夜間移行率の推移を示す。BESTと実測の熱源処理熱量は概ね一致していた。夜間移行率について概ね再現できているが7月に15%の差があった。これは名大CKKビルにおいて7月に熱源の不具合が発生し、蓄熱不可となっていた期間があったことと機能性能試験が行わ

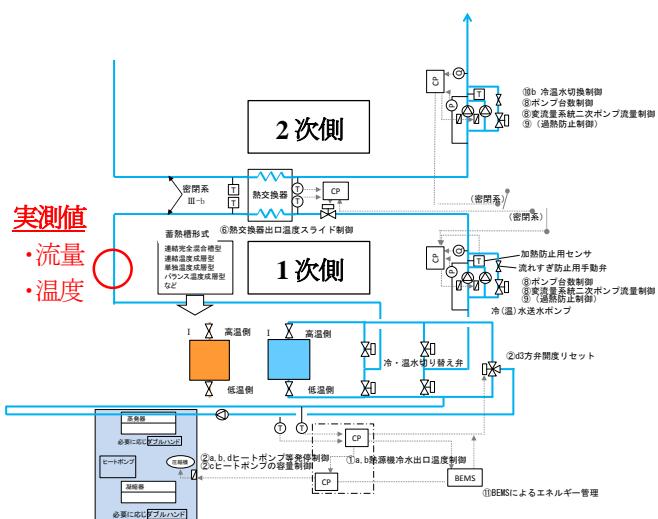


図1.BESTシミュレーション範囲(冷水系統)

れ昼間の運転が増えた影響である。他の月で傾向は一致しており、BESTにて精度よく再現できていると言える。

1.4 夏期代表日における実測値比較

図3に8/8～8/15の熱源処理熱量・負荷流量・蓄熱槽温度推移を示す。負荷流量は実測値を入力しているため完全に一致している。熱源の稼働状況を見ると、BEST、実測共に22:00より起動し、夜間の間に蓄熱している様子がわかる。但し、BESTでは起動時にハンチングが起こっており、落ち着くまで約1h要す。制御値の入力に原因があると推定されるが、原因の特定には至っていない。本シミュレーション上は熱処理・槽内温度の異常等の不具合に発展しておらず、主眼を蓄熱槽の動きとしているためここでは取り上げない。熱源処理熱量は概ね一致しているが、表1の熱源能力348.5kWと比較して250kWと小さい。これは前述の通り、定格能力比率75%で稼働しているためである。次に、蓄熱槽の温度推移をみていく。実測では蓄熱最適化制御システムにより蓄熱余量まで考慮された、必要最小限の熱源運転時間となっている。それに対しBESTでは次の日の積算負荷を貯える熱源運転時間を設定し22時から稼働させていく。その違いにより、槽内水温の推移が一部異なるが、両

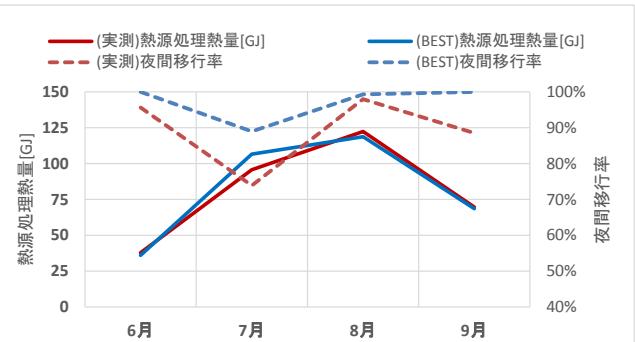


図2.月別熱源処理熱量と夜間移行率

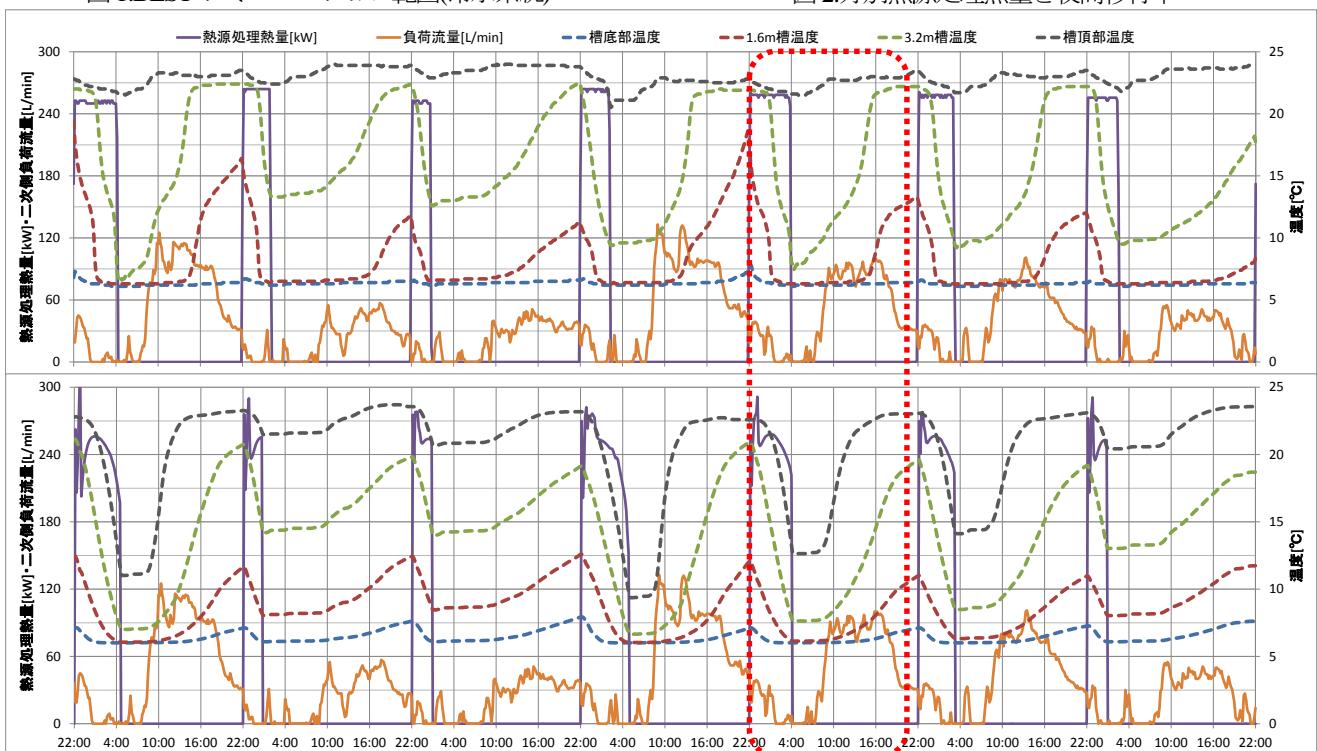


図3. 8/8 22:00～8/15 22:00の1次側の状態推移図(上段：実測、下段：BEST)

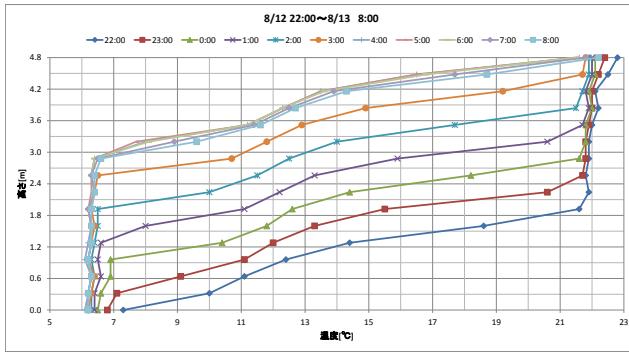
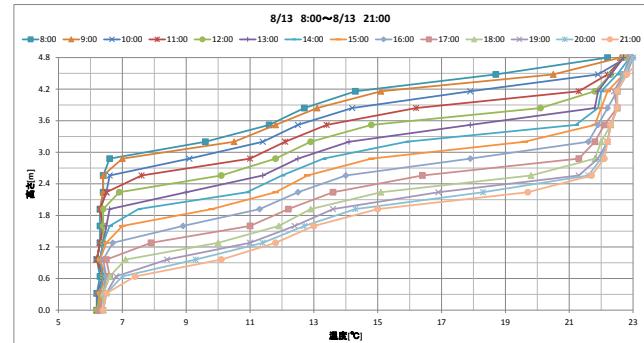


図4.実測 8/12 22:00~8/13 8:00



21:00 蓄熱槽温度プロファイル

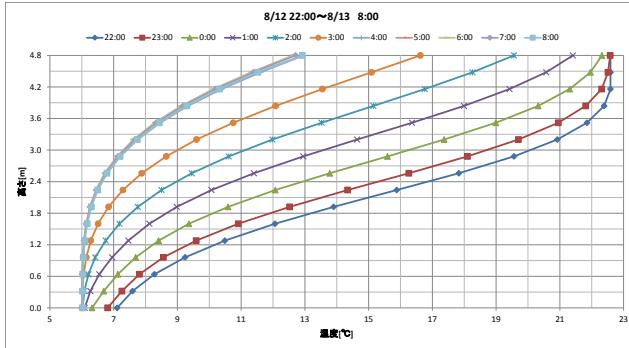
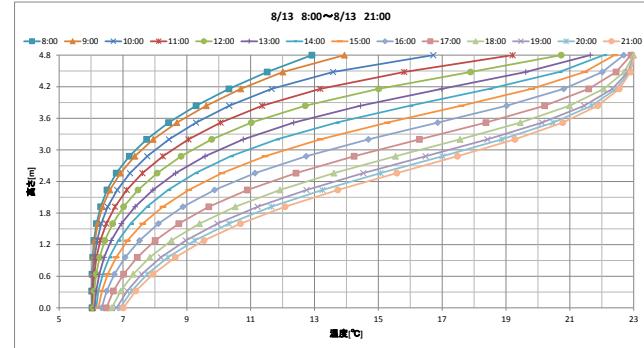


図5.BEST 8/12 22:00~8/13 8:00



21:00 蓄熱槽温度プロファイル

者とも夜間蓄熱で昼間の負荷を貯めており、加えて利用温度差、利用蓄熱量もほぼ一致しており、蓄熱余量を除けば精度よく再現できているといえる。図4~図5に8/12 22:00~8/13 21:00(図3赤枠部)の蓄熱槽温度プロファイルを示す。実測とBESTで槽の利用域は異なるが、温度成層の勾配も含めプロファイルの形状は概ね一致している。つまり、BESTで温度成層型蓄熱槽内が現実を忠実に再現可能であるといえる。

2. BESTによるFCU方式とPAC方式の省エネ性検討

2.1 対象建物と比較システム

比較システムであるPAC方式の機器については、前報³⁾と同様にFCU能力を参考にPAC室内機と置き換えて選定し、屋外機(COP3.9~4.3)は各階2~3系統にわけ屋外機置場に設置した。その結果、屋外機は16台、定格能力の合計は冷房能力650.7kW、暖房能力727.5kW、屋内機は141台、定格能力の合計は冷房能力658.7kW、暖房能力738.7kWとなった。なお、FCUは148台、設計能力の合計は冷房能力504.6kW、暖房能力205.0kW、空冷HPは冷/暖房能力355/355kW、COPが3.66/3.11、熱源以外の機器、蓄熱槽は表1による。実モデルに合わせて加湿装置は設けられていない。計算対象期間は夏期の6月~9月、冬期の12月~3月とした。

2.2 シミュレーションモデルと負荷

計算モデルとしてBESTでは名大CKKビルの設計図書を参考にFCU系統を入力し、PAC方式は上述の通り機器を入れ替えた。LCEMモデルはFCU、PAC共に前報³⁾と同じモデルを使用した。なお、機器の定格能力は両ソフトで同じ値としたが、特性式等は各ソフトのデフォルト値による。

また、負荷について触れておく。図6に各方式の処理熱量と入力負荷を示す。入力負荷はBESTで計算したもので、その計算結果をLCEMに入力している。前報³⁾でも負荷に

ついて検討が行われているが、本報では実測データから得たFCUの稼働時間を参考に各室の空調スケジュールを作成後、内部負荷の稼働率を各月の実測負荷と合うように設定した(夏期:15%、冬期:10%)。

2.3 FCU方式とPAC方式の計算結果比較

(1) 入力負荷と処理熱量

まず処理熱量を確認する(図6)。各方式の処理熱量と入力負荷を比較すると、総じてBESTの処理熱量が入力負荷に近似するのは入力負荷自体がBEST計算によるからであるが、夏期の冷房処理熱量のFCU方式とPAC方式との差が、LCEMとでは逆になっている。即ち、前報³⁾で考察したようにLCEMではPACは過除湿するのに対して、BEST計算では除湿不足となり、室内相対湿度が設定値50%に対し60%を超える時間が長くなっている。これについては両プログラムのVRF室内機コイル熱交換モデルの比較検討が必要であると思われる。処理熱量と入力負荷の比較では、BESTのPAC方式、LCEMのFCU方式は処理熱量の方が約10%小さく、LCEMのPAC方式は夏期では約10%処理熱量の方が大きく、冬期は約20%処理熱量の方が小さい。

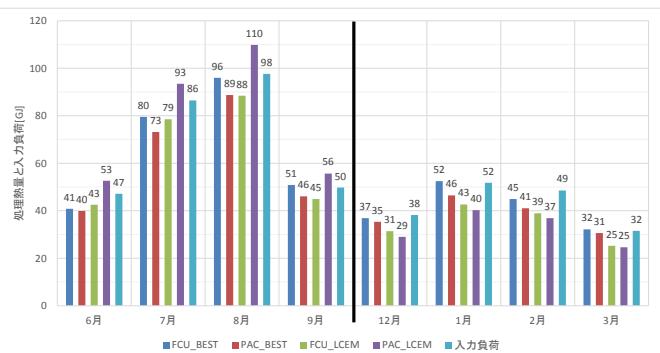


図6.各方式の処理熱量と入力負荷

(2) 1次エネルギー消費量

図7にはFCU方式の、図8はPAC方式の、それぞれ夏冷房時と冬暖房時の1次エネルギー消費量を示す。FCU方式の1次エネルギー消費量はPAC方式に対して、BESTによれば夏期に約40%、冬期に約20%、少なく、LCEMによれば夏期に約60%、冬期に約50%少ない。両ソフトとも処理熱量を勘案してもFCU方式(中央熱源蓄熱方式)の方が有利である。有利な要因はPAC方式では効率が悪くなる部分負荷運転の時間が大部分を占めるのに対し、FCU方式では蓄熱槽を有することで、高効率な全負荷運転を保てるためである。但し本建物では設置機器に対し負荷が小さかつたため、その傾向を助長した側面は有るが、設置容量が過剰気味になるのはVRFでは一般的である。

室内機ファンのエネルギー消費量がFCUで多いのは、VRFがVAVで運転するに対してFCUは送風量が「H」で固定されているためであり、実態として大部分が「M」である(L速度は大温度差還水を阻害するので用いない)事を勘案すると計算上、半分程度以下になるであろう。

2.4 BESTとLCEMの計算結果比較

FCU方式では空気搬送を除き概ね一致していた。空気搬送についてはBESTとLCEMで共に定風量と設定しているがエネルギー消費量の差が大きかった。これは、BESTでは負荷がある場合、各計算ステップ(5分)でFCUが常時稼働している計算だが、LCEMでは計算ステップ(1時間)内で生じた負荷を取り除くために必要なFCU稼働時間を算出し、その時間分しかファンが稼働しないためである。この影響は負荷の小さい時期に顕著になるであろうことが予想され、事実、計算結果でも低負荷である時期に差が大きくなっている。夏期のPACに対する差は、前述の通り過除湿の有無によるものが大きいようである。冬期の動きを見れば熱源特性に差が有るかもしれない。



図7.BEST及びLCEMによる夏・冬のFCU方式の1次エネルギー消費量比較



図8.BEST及びLCEMによる夏・冬のPAC方式の1次エネルギー消費量比較

おわりに

本報では、1次側のBESTと実測値との比較、並びにBESTとLCEMによるFCU方式とPAC方式の比較を行った。

まずBESTと実測を比較した結果、蓄熱運転制御については完全な再現が困難であった。その他熱源の負荷処理状況や槽内の温度推移の再現性に問題は見られず、実測を精度よく再現できている。但し本報では実測による検証に関しては、実負荷の特殊性と熱源運転の問題があつたために、夏期の1次側のみに焦点を当てており、2次側も含んだ年間トータルシステムシミュレーション結果との比較がなされていないので、その精度検証は今後の課題としたい。

次にFCU方式とPAC方式の比較をBEST、LCEMにて行い、両方式の省エネルギー性の検証、両ソフトの特性を把握した。FCU方式とPAC方式の比較では両ソフト共、FCUが1次エネルギー的に有利であった。BEST、LCEMのソフト間で計算結果を比較すると、PACで差が大きかったが、除湿モデルと熱源特性に差があると想定された。

【謝辞】

本報は、(一財)建築環境・省エネルギー機構内に設置された産官学連携による環境負荷削減のための建築物の総合的なエネルギー消費量算出ツール開発に関する「BESTコンソーシアム」・「BEST企画委員会」および「専門版開発委員会」・「蓄熱・蓄電等システム検討SWG」の活動成果の一部であり、関係各位に謝意を表します。また名大CKKビルの運転データ等の提供にご協力頂きました奥宮正哉名大教授、三晃空調西谷義彦氏ほか、関係各位にお礼申し上げます。

【参考文献】

- 中原ほか：大学施設のトータルビルコミッショニングの実践研究、第1報～第19報、空気調和・衛生工学会講演論文集、2012～2015
- 中原・奥宮：省エネルギー型大温度差水蓄熱・FCU-水・空気式空調システムの性能、第1報：概要、空気調和・衛生工学会講演論文集、2016.9予定
- 西谷ほか：同上、第2報、2016.9予定

